

国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議
素粒子原子核物理作業部会報告（案）

当作業部会は、平成 26 年 6 月以降 8 回にわたり、国際リニアコライダー（ILC）計画の目指す研究内容と、その内容が巨額の投資に見合った科学的意義を有するかについて検証・議論し、平成 27 年 3 月に報告をまとめた（以下、「前回報告」という。）。同報告を踏まえて、国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議（以下、「有識者会議」という。）は、平成 27 年 6 月に「これまでの議論のまとめ」を公表した。その際は、ILC は初期衝突エネルギー 500GeV (GeV=10 億電子ボルト¹) の電子・陽電子衝突型加速器と想定して議論を行った。

その後、ILC に関する国際的な研究者組織の一つであるリニアコライダー・コラボレーション（以下、「LCC」という。）でまとめられた ILC 計画の見直し案²が、リニアコライダー国際推進委員会（以下、「LCB」という。）における審議³を経て、国際将来加速器委員会（以下、「ICFA」という。）において承認⁴され、平成 29 年 11 月に公表された。この見直しにおいては、2017 年までの 13TeV LHC 実験の結果を踏まえた上で建設に必要なコストを引き下げることも考慮して、ILC 計画は衝突エネルギーを 500GeV から 250GeV とする提案（以下、「250GeV ILC」という。）に変更された。この公表を受けて平成 29 年 12 月に開催された有識者会議において、250GeV ILC の科学的意義について検証し、留意すべき点について専門的見地から検討を行うため、当作業部会が再度設置された。今回の当作業部会では、特に前回報告において最新の知見を踏まえて再度検証が必要となった部分について、平成 30 年 1 月以降全●回にわたり議論し、検証を行った。本報告は、その結果について示すものである。

1. 欧州合同原子核研究機関（CERN）における実験結果について

- 前回報告及び「これまでの議論のまとめ」においては、ILC の性能、得られる成果等については、欧州合同原子核研究機関（以下、「CERN」という。）が設置する大型ハドロン衝突型加速器（以下、「LHC」という。）におけるエネルギー増強後の 13TeV LHC によるⅡ期実験の結果に基づき見極めることが必要とされている。
- LHC の実験スケジュールについて、13TeV によるⅡ期実験は当初 2015 年から 2017 年とされてきたが、その後 2018 年まで延長されている。当作業部会において 2017 年末ま

¹ 電子ボルト (eV) : エネルギーの単位。電子ひとつが1ボルトの電圧で加速されたときに得るエネルギーの量。1eVは、質量 1.782×10^{-33} gに相当する。

² 「Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider」(LCC Physics Working Group / October, 2017) , 「The International Linear Collider Machine Staging Report 2017」(Linear Collider Collaboration / October, 2017)

³ 「Conclusions on the 250 GeV ILC as a Higgs Factory proposed by the Japanese HEP community」(Linear Collider Board, 8 November 2017, Rev 1)

⁴ 「ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory」(Ottawa, November 2017)

での LHC における実験結果を確認したところ、様々な成果はあるものの、標準理論を超える新粒子（強い相互作用をする超対称性粒子の可能性のある粒子）・新現象（暗黒物質や余剰次元）の兆候は捉えられていない。

- さらに、これまでの実験結果から、LHC において、Ⅱ期実験が続く 2018 年末までに新粒子や新現象が観測される可能性は低いことが判明しており、前回報告において示されている以下のシナリオについては、(1)(2) は困難となり、(3) 13TeV LHC で新粒子や新現象が観測されない場合となった。ただし、250GeV ILC は、当初計画の 500GeV ILC から衝突エネルギーを下げ、ヒッグスファクトリーとして運転を行うように見直したことから、その内容については修正を要する。(→3.)

前回報告 6. (1) ~ (3) 【抜粋】

6. 13TeV LHC の成果を踏まえた ILC 等のシナリオ

13TeV LHC での成果を踏まえたシナリオに応じ ILC 計画で実施する場合の今後の戦略方針は以下のとおり。

(1) 13TeV LHC で新粒子（強い相互作用をする超対称性粒子の可能性のある粒子）が発見された場合

方針：ILC により、ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定から、新粒子の背後にある物理現象を解明する。LHC において、強い相互作用をする新粒子が割合軽い⁵場合や 250GeV 以下の質量をもつ新粒子に崩壊しているらしいとの示唆がある場合には、ILC においてこの新粒子を発見し、詳細解明を行うことが期待される。そうでない場合は、エネルギーアップグレードがゆくゆくは必要となる。

効果：超対称性の存在の証明、あるいは複合ヒッグス粒子の確認などにつながり、大きな発見や研究の進展が期待される。ILC で新粒子が発見された場合にも、大きな研究の進展が期待される。

⁵ ILC で発見される可能性がある最も軽い新粒子の質量は、典型的な超対称性理論では強い相互作用をする超対称性粒子の概ね 1/7 以下とされている。ただし、理論的には不定性が大きいという意見もあることに留意が必要。

(2) 上記以外の新現象(暗黒物質や余剰次元)と思われる事象の兆候が観測(発見)された場合

方針: LHC で発見された新現象の性質を ILC で精査し、ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定とあわせて、標準理論を超える物理を研究する。

効果: 暗黒物質の初観測や余剰次元の探索の足がかりの観測により、大きな発見と研究の進展が期待される。

(3) 13TeV LHC で新粒子や新現象が観測されない場合

方針: ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定から標準理論を超える物理(超対称性理論、複合ヒッグス理論等)を探索する。また ILC は LHC では検出が困難なタイプの新粒子にも感度があるため、これらの新粒子の探索も行う。LHC で未発見の原因を精査し、ILC で発見できる新粒子を探索するとともに、将来のエネルギーアップグレードの必要性を検討する。

効果: 標準理論からのズレが観測された場合は、そのズレの大きさとパターンから、標準理論を超える物理の方向性と関連する新物理のエネルギースケールが明らかになる。新粒子が発見された場合にも、大きな研究の進展が期待される。

2. 250GeV ILC の科学的意義について

○ 国際研究者コミュニティにおいて、ILC 計画の衝突エネルギーを 500GeV から 250GeV に下げる見直しが行われた。これにより、加速器の建設コストを引き下げ、ILC 計画の目標について焦点を絞ったものにすることができる、とされている。

○ 前回報告においては、ILC の目指す科学的意義を以下のとおり整理していた。

(1) ヒッグス粒子やトップクォークの詳細研究によるヒッグス機構の全容解明で標準理論を超える物理を探索

(2) 超対称性粒子などの新物理の探索、及び発見された場合その詳細研究⁶

(3) その他(暗黒物質や余剰次元)

○ (1) のヒッグス粒子の詳細研究に関しては、衝突エネルギー 250GeV でヒッグス粒子の生成断面積が最大化されることに加え、13TeV LHC で新粒子の兆候が観測されず

⁶ LHC で新たな物理が発見される場合、それが ILC のエネルギー範囲や測定精度でどの程度まで解明し得るか等の点にも留意が必要。

250GeV ILC でのヒッグス粒子の精密測定に有効場理論が利用できることが明らかになった⁷ことから、ヒッグス粒子の精密測定の実現可能性が明確になったといえる。

- 250GeV ILC による実験が最も優位性を有するのは、ヒッグス粒子と素粒子の結合定数の精密測定である。ヒッグス粒子は現在知られている強い相互作用及び電弱相互作用による力を感じない新粒子とも結合し得る性質があり、暗黒物質や通常の実験では検出不可能な粒子とも相互作用すると考えられる。結合定数を高い精度で測定し、標準理論からずれのパターンが見いだされれば、新しい物理の性質に関する情報が得られる。その結果が、今後の素粒子物理学が進む方向性に示唆を与える可能性がある。例えば、暗黒物質の正体やヒッグス粒子が真の素粒子か複合粒子であるかどうかなど、現在の標準理論では説明が困難な課題に対し、ヒッグス粒子の結合定数の精密測定が、その解明の端緒を与える可能性がある。
- 一方、500GeV ILC から 250GeV ILC と衝突エネルギーを下げたことにより、前回報告において、ILC 計画における重要な課題の一つとして挙げていたヒッグス粒子の三点結合（一つのヒッグス粒子から二つのヒッグス粒子ができる反応）の測定は少なくとも衝突エネルギー500GeV が必要であり、250GeV ILC では実験が不可能となる⁸。また、トップクォークの精密測定についても、衝突エネルギー350GeV が必要であることから、250GeV ILC では実験が不可能となる。⁹
- (2) については、前述の 2017 年末までの LHC における実験結果から、強い相互作用をする超対称性粒子については 1.5TeV~2TeV 以下に存在する可能性が極めて低いと考えられる。したがって、ILC で発見される可能性があり、LHC では探索が困難な強い相互作用をしない超対称性粒子¹⁰については、当初計画の 500GeV ILC で発見できる可能性は低く、見直し後の 250GeV ILC では更に低い。
- 一般に電子・陽電子衝突実験は LHC に代表される陽子・陽子衝突実験では検出が困難なタイプの新粒子にも感度があるが、250GeV ILC で直接生成される可能性は低い

⁷ 結合定数の精密測定に必要なヒッグス粒子の全崩壊幅の決定は、250GeV ILC では困難と考えられていたが、新粒子が直接生成されないエネルギー領域では、全崩壊幅の決定に有効場理論に基づく近似計算が十分な精度で適用できることが判明した。

⁸ 仮に三点結合定数の標準理論からのズレが予想を超えて大きい場合は、250GeV ILC でヒッグス粒子と Z 粒子等との結合定数の精密測定により検証できる。

⁹ LHC の将来計画である HL-LHC におけるトップクォークの質量測定精度は標準理論における真空の安定性の検証が可能なまでに向上すると考えられるため、ILC において衝突エネルギーを 350GeV にまで上げてトップクォークの質量を精密に測定する物理的な意義は下がる。

¹⁰ LHC で発見された新粒子が強い相互作用をする超対称性粒子の場合、ILC で発見される可能性がある最も軽い新粒子の質量は、典型的な超対称性理論では強い相互作用をする超対称性粒子の概ね 1/7 以下とされている。ただし、理論的には不定性が大きいという意見もあることに留意が必要。

め、主にヒッグス粒子の結合定数の精密測定や輻射補正¹¹の測定等の間接的な方法を用いて探索する。

- (3)については、ヒッグス粒子のインビジブル崩壊や一光子事象、標準理論粒子の対生成における輻射補正等を測定することで暗黒物質や余剰次元等の存在を見極める間接的な方法¹²をとるので、250GeV ILCにおいてもその意義は余り下がらない。

3. 13TeV LHC の結果を踏まえた 250GeV ILC のシナリオ及び留意点

- 科学的意義の観点から、13TeV LHC の結果を踏まえた 250GeV ILC のシナリオは以下のとおり。

13TeV LHC の結果を踏まえた 250GeV ILC のシナリオ（科学的意義の観点）

方針：ヒッグス粒子を精密測定し、標準理論を超える物理の解明の端緒となる事象を探索する。また、主に間接的な方法による暗黒物質や余剰次元等の探索も行う。

効果：ヒッグス粒子と他の素粒子との結合定数の測定において標準理論からのズレが観測された場合は、そのズレの大きさとパターンから、標準理論を超える物理の方向性と関連する新物理のエネルギースケールが明らかになる。
また、暗黒物質や余剰次元等が観測された場合も研究の大きな進展が期待される。

- 他方、13TeV LHC の結果から、ILC では新粒子の直接探索による発見の可能性は低い。更に 500GeV ILC から 250GeV ILC への見直しにより、トップクォークの精密測定は実施できないことに留意する必要がある。
- 上記シナリオの妥当性については、技術設計報告書（TDR）検証作業部会において示される 250GeV ILC のコスト見積り等も併せて検討されるべきものである。

¹¹ 量子力学の不確定性原理によると、非常に短い時間内では高いエネルギー状態になることができるため、まれにしか起こらない超高エネルギー状態を経由する崩壊を観測することにより、重い粒子の影響を低いエネルギーでも調べることができる。

¹² 電子・陽電子衝突では衝突のエネルギーが正確に決まっているため、暗黒物質や余剰次元に関連する粒子に関しては、生成された側と反対側に放出された粒子を計測することで欠損エネルギーと欠損運動量を算出する等の方法により、その粒子の質量を決めることができる場合がある。

LHCの13TeV運転の成果に応じた500GeV ILCのビジョン

別添1

13TeV LHCでの実験結果を踏まえた500GeV ILCでの研究の科学的意義及び国際的な求心力の変化	13TeV LHCの実験結果による変化					備考
	ILCの科学的意義		ILCの国際的な求心力			
	上がる	変わらない	下がる	上がる	変わらない	
1. ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定から標準理論を超える物理の探索						
LHCで新粒子の発見があった場合				上がる	変わらない	下がる
LHCで新粒子の発見がない場合				上がる		
2. 超対称性粒子などの標準理論を超える新粒子の直接探索による新物理の研究						
LHCで新粒子の発見があったが、対応する新粒子がILCで直接見える可能性が低い場合					↑ ↓	ILCで見える可能性が低い場合は、エネルギーアップグレードがゆくゆくは必要となる。エネルギーアップグレードによって新粒子が直接見える可能性が高い場合は、ILCが一定程度の求心力を有するとの意見もある。
LHCで新粒子の発見があり、対応する新粒子がILCで直接見える可能性が高い場合						新粒子の素性を解明する上で、非常に大きな科学的意義があり、国際的な求心力も高まる。
LHCで新粒子の発見がない場合					↑ ↓	ILCで探索可能な新粒子が存在する質量領域が現在より狭まる。しかし、ILCにおける新粒子の探索については手がかりがほとんどないことから、ILCでも新粒子の発見が可能との意見があるほか、ILCがLHCとは異なるタイプの新粒子に敏感であるため、相対的に求心力がある、または高まるとの両論がある。

※当作業部会前報告書(H27. 3)別添について、その後のLHCにおける実験結果を踏まえると、赤枠のシナリオとなる。

(1)LHCで発見された新粒子が強い相互作用をする超対称性粒子の場合、ILCで発見される可能性がある最も軽い新粒子の質量は、典型的な超対称性理論では強い相互作用をする超対称性粒子の概ね1/7以下とされている。ただし、理論的には不定性が大きいという意見もあることに留意が必要。

(2)LHCで探索可能な新粒子の質量の上限は、2 TeV (2000 GeV)。500 GeV ILCで直接探索可能な新粒子の質量の上限は250 GeV。(8TeV LHCでの実験の結果、1 TeV以下では強い相互作用をする新粒子の発見なし。)

500GeV ILC(当初計画)と250GeV ILC(見直し後)の科学的意義の比較(案)

別添2

500GeV ILC(当初計画)で期待されていた成果 [前回報告書とりまとめ(2015年3月)時点]		LHCの13TeV運転の結果を踏まえて 250GeV ILC(見直し後)に期待される成果			備考	
説明される物理 (ILCにおける重要度順)	実験における観測量	実験の可否		科学的意義の変化		
		(参考) 500GeV	250 GeV	上がった	変わらない	下がった
(1) ヒッグス粒子精密測定による新たな物理の探索	ヒッグス粒子結合定数の測定 ・クォーク(トップ以外) ・荷電レプトン ・ゲージボソン	可	可	◆		<ul style="list-style-type: none"> ヒッグス粒子の精密測定により、標準理論を超える新物理の探索が可能であり、250GeVでヒッグス粒子の生成断面積が最大になる。 ヒッグス粒子の三点結合の測定は500GeVが必要であり、250GeVでは不可能となるが、仮に三点結合定数の標準理論からのズレが大きい場合は、ヒッグス粒子とZ粒子等との結合定数の精密測定により検証できる。 結合定数の精密測定に必要なヒッグス粒子の全崩壊幅は、新粒子が直接生成されないエネルギー領域では、有効場理論を用いて決定できることが判明した。
(2) 新粒子直接探索	超対称性粒子探索 拡張ヒッグス粒子探索	可能性低い	可能性更に低い		◆	<ul style="list-style-type: none"> 質量500GeV(衝突エネルギー1TeV)以下に新粒子が存在する可能性は、LHC実験の結果によりほぼ棄却された。
(3) 間接的方法による暗黒物質や余剰次元等の探索	モンジュエット、一光子放出事象等のエネルギー・質量欠損事象	可	可		◆	<ul style="list-style-type: none"> ヒッグス粒子のインビジブル崩壊や一光子事象、標準理論粒子の対生成における輻射補正の測定等の間接的な方法で暗黒物質や余剰次元等の探索が可能である。
(4) 標準理論真空安定性の検証	トップクォーク質量精密測定	可	不可		◆	<ul style="list-style-type: none"> トップクォークの質量をILCで精密に測定するためには、350GeV以上のエネルギーが必要である。 LHC実験でのトップクォーク質量測定精度は当初の予定より向上している。

(参考) ILC と近い分野の最近の同様の国際プロジェクトの例

○ 平成 29 年 11 月に公表された LCB 及び ICFA の声明では、ILC と近い分野の最近の同様の国際プロジェクトの例として、ドイツにある欧州 X 線自由電子レーザーと反陽子・イオン研究施設が挙げられていることを踏まえ、当作業部会において聴取した両プロジェクトの概要は以下のとおり。

○ 欧州 X 線自由電子レーザー (E-XFEL)

- ・ 12 か国の国際協力によりドイツの DESY (ドイツ電子シンクロトロン研究所) に併設され、自由電子レーザーの原理により過干渉性高輝度 X 線を発生させて、原子・分子・細胞などの微細構造の研究を行う施設。
- ・ 建設費は 12 億 2,000 万ユーロ (約 1,670 億円)。負担割合はドイツ 58%、ロシア 27%、その他各国 1~3% (デンマーク、フランス、ハンガリー、イタリア、ポーランド、スロバキア、スペイン、スウェーデン、スイス、英国)
- ・ 2003 年、ドイツ政府は、国際研究者コミュニティから提案のあった TESLA リニアコライダーと XFEL について、XFEL のみ建設費の 50%を負担する用意があることを表明し、政府レベルでの国際交渉が開始された。
- ・ 当初、欧州各国からの貢献表明は各国 1~3%に留まっていたが、ロシアが 2 億 5,000 万ユーロ (342 億円) の貢献を表明。2009 年に国際プロジェクトとして条約が調印され建設が開始された。
- ・ その後、加速器建設等によるコスト増加が明らかになったが、当初計画したものを建設した。完成が 1 年遅れた影響もあって建設コストは条約調印時から約 13%増加した。
- ・ 同計画に携わった研究者の懐述として、以下の点が指摘されている。
 - ・ 加速器建設のみならず土木建設の費用についても国際分担が行われたが、土木建設はドイツが全責任を持つ体制の方が手続きの煩雑性を回避できたはずである。

○ 反陽子・イオン研究施設 (FAIR)

- ・ 9 か国の国際協力によりドイツの GSI (ドイツ重イオン研究所) に併設して建設中であり、重イオンビームによるハドロン高密度物質の研究や不安定核・宇宙核物理の研究、多種イオンビームによるプラズマ物理研究やがん治療等の応用研究、反陽子ビームによるハドロン物理の研究等を行う施設。
- ・ 建設費は 12 億 6,200 万ユーロ (約 1,730 億円)。負担割合はドイツ 69%、ロシア 17%、その他各国 0.5~3.5% (フィンランド、フランス、インド、ポーランド、ルーマニア、スウェーデン、スロベニア)
- ・ 2003 年、ドイツ政府は、国内プロジェクトとして提案のあった FAIR について、建設費の 25%は外国負担とすることを成立条件と決定。以降、各国研究者間の議論を経て政府レベルでの国際交渉が開始された。

- ・ 当初、欧州各国からの貢献表明は各国 0.5～3.5%に留まっていたが、ロシアが1億8,000万ユーロ（246億円）の貢献を表明。2010年に国際プロジェクトとして条約が調印され建設が開始された。
- ・ その後、建設地の軟弱地盤への対応や東日本大震災を踏まえた放射線安全基準対策等によるコスト増加が明らかになり、2014年にドイツ政府は建設を中断するとともに外部評価により計画を見直し、2017年に再度起工式を実施して2025年の完成を目指しているが、協定調印時から完成は8年遅れ、コストは約23%増加している。
- ・ 上記外部評価に携わった研究者の懐述として、以下の点が指摘されている。
 - ▶ プロジェクトマネジメントが機能しておらず、プロジェクト内の異なるグループや階層間のコミュニケーションが欠けていた。
 - ▶ コストの増加や計画の遅れの主な原因は、土木建築（ドイツが全負担）の混乱であり、加速器や測定器等の技術的な面は、それよりは良い状態であった。
 - ▶ 科学的な競争力は、計画の大幅な遅れによって明らかに低下している。

○ 当作業部会における議論では、両プロジェクトともドイツ国内法に準拠した有限責任会社を設立する特殊な形態であることや既存の研究所に併設して建設されていること、さらに FAIR については国内プロジェクトから発展した多目的施設であることなど ILC の同様の例とならない部分も多いため、両プロジェクトを例示した LCB に対してその意図を確認したところ、回答は以下のとおりであった。

素粒子原子核物理作業部会へのリニアコライダー国際推進委員会（LCB）からの回答

2017年11月に開かれたオタワでのLCB会議で出されたILCに関する声明文においてリニアコライダーから派生したX線自由電子レーザー施設のXFELと、素粒子原子核物理施設のFAIRが、ILC推進議論を進めるために関連するとされた部分の2点は、両方のプロジェクトにおいてホスト国が

1. 負担する割合が高く、
2. まず施設を相当額の拠出をしてホストしたい意思があると宣言し、国際協力の立ち上げとプロジェクト推進のイニシアティブを取った、

である。現状においてILC建設を立ち上げるには、ホスト誘致国が国際協力の話し合いを立ち上げるイニシアティブを取る必要があり、その際にホスト国として相応なレベルの貢献を考えているとの示唆があることが望ましい、との判断に基づくものである。